

Paper Type: Original Article

Design of an Integrated Model Combining ALT and ADT for Lifetime Estimation in the Reliability Analysis of a Turbine Engine Nozzle

Zahra Azhari^{1,*}, Mehdi Karbasian¹ , Behrooz Shahriari² 

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industry, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran; Azhrizhra2@gmail.com; mkarbasi@mut-es.ac.ir.

² Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran; shahriari@mut-es.ac.ir.

Citation:

Received: 26 November 2024

Revised: 04 February 2025

Accepted: 17 March 2025

Azhari, Z., Karbasian, M., & Shahriari, B. (2025). Design of an integrated model combining ALT and ADT for lifetime estimation in the reliability analysis of a Turbine Engine Nozzle. *Journal of Quality Engineering and Management*, 15(1), 50-66.

Abstract

Purpose: Reliability is one of the most critical quality characteristics of components, products, and systems. Unlike other attributes, it cannot be directly measured and is usually evaluated only after significant operational time under real conditions. However, waiting for long-term field data may reduce market competitiveness in commercial industries and pose serious safety risks in sensitive systems such as military equipment. Therefore, reliability prediction plays a vital role in key decision-making areas such as product release timing, warranty policies, and maintenance planning. This study aims to present an integrated model based on accelerated degradation testing and accelerated life testing to predict the lifetime of a turbine engine nozzle under operational conditions.

Methodology: Initially, the ADT was designed and conducted to monitor the degradation trend of the nozzle's critical feature at various temperature and time levels. Using the power-law model and the Arrhenius acceleration model, acceleration parameters and activation energy were estimated. Subsequently, the ALT was implemented using the extracted parameters under high-stress thermal conditions, and the corresponding failure times were recorded. Finally, by integrating the results of both tests and applying statistical analysis methods—such as maximum likelihood estimation and degradation path modeling—the lifetime distribution of the system was modeled.

Findings: The implementation of the proposed model on a turbine engine nozzle demonstrated its capability to predict lifetime and significantly reduce testing time and cost accurately.

Originality/Value: This model introduces a novel analytical framework by systematically combining two different types of testing (ADT and ALT), where the output of one test serves as the input for the other. The proposed approach can be generalized and applied to other critical industrial and defense-related products.

Keywords: Reliability, Accelerated Degradation Testing, Accelerated Life Testing, Arrhenius Model, Turbine Engine Nozzle.



طراحی یک مدل تلفیقی از آزمون‌های ALT و ADT برای محاسبه طول عمر در قابلیت اطمینان

نازل یک موتور توربینی

زهرا اظهري^۱، مهدی کرباسیان^۱، بهروز شهریاری^۲

^۱گروه مهندسی صنایع، مجتمع دانشگاهی صنایع و مدیریت دانشگاه مالک اشتر، اصفهان، ایران.

^۲مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

چکیده

هدف: قابلیت اطمینان یکی از ویژگی‌های کیفی مهم برای قطعات، محصولات و سیستم‌ها است که برخلاف سایر ویژگی‌ها، مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست و معمولاً تنها پس از طی زمان قابل توجهی در شرایط عملیاتی واقعی قابل ارزیابی است. با این حال، انتظار برای جمع‌آوری داده‌های میدانی ممکن است در صنایع تجاری منجر به کاهش فروش و در سیستم‌های حساس مانند تجهیزات نظامی، تهدیدی جدی برای ایمنی افراد باشد. از این رو، پیش‌بینی قابلیت اطمینان نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های کلیدی نظیر زمان عرضه محصول، سیاست گارانتی و برنامه‌ریزی نگهداری ایفا می‌کند. هدف این پژوهش، ارائه یک مدل تلفیقی از آزمون‌های تنزل کارکرد و آزمون‌های عمر شتاب‌یافته به منظور پیش‌بینی طول عمر نازل موتور توربینی در شرایط عملیاتی است.

روش‌شناسی پژوهش: در مرحله نخست، آزمون ADT جهت ثبت روند تخریب مولفه کلیدی نازل در سطوح مختلف دما و زمان طراحی و اجرا شد. سپس با بهره‌گیری از مدل توان و مدل آرنیوس، پارامترهای شتاب و انرژی فعال‌سازی استخراج گردید. در مرحله بعد، آزمون ALT با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده و تحت شرایط تنش بالا اجرا و داده‌های مربوط به زمان‌های خرابی مستقیم ثبت شد. در نهایت، با تلفیق نتایج دو آزمون و تحلیل آماری (شامل برآورد حداکثر احتمال و تحلیل مسیر تخریب)، توزیع طول عمر سیستم مدل‌سازی شد.

یافته‌ها: پیاده‌سازی مدل بر روی نازل یک موتور توربینی نشان داد که مدل پیشنهادی توانایی پیش‌بینی دقیق طول عمر را داشته و می‌تواند منجر به کاهش زمان و هزینه‌های آزمون گردد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: این مدل با ترکیب نظام‌مند دو نوع آزمون (ALT و ADT) و بهره‌گیری از خروجی یکی به عنوان ورودی دیگری، ساختار تحلیلی نوینی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان ارائه می‌دهد که قابلیت تعمیم به سایر محصولات حساس صنعتی و دفاعی را نیز دارا است.

کلیدواژه‌ها: قابلیت اطمینان، آزمون تنزل کارکرد، آزمون شتاب‌یافته، مدل آرنیوس، نازل موتور توربینی.

۱- مقدمه

قابلیت اطمینان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های کیفی در طراحی، تولید و بهره‌برداری از محصولات مهندسی، به‌ویژه در سیستم‌های پیچیده و حساس مانند صنایع نظامی، هوانوردی و فضاپیماها است. از آنجا که این محصولات معمولاً در شرایط عملیاتی سخت و غیرقابل پیش‌بینی استفاده می‌شوند،

برخورداری از قابلیت اطمینان بالا برای جلوگیری از خرابی‌های ناگهانی و کاهش خسارات اقتصادی، انسانی و حتی سیاسی ضروری است [1]. مشتریان نیز انتظار دارند که محصولات خریداری شده، عملکرد بدون نقصی داشته و با کم‌ترین هزینه، بالاترین سطح از قابلیت اطمینان را ارائه دهند [2]. قابلیت اطمینان سازه‌ها و اجزای مهندسی به صورت مستقیم تحت تأثیر فرآیندهای تخریبی همچون خوردگی، فرسایش، وادادگی، خستگی و دوام قرار دارد [3]. به همین دلیل، ارزیابی دقیق این پارامتر در مراحل مختلف طراحی، توسعه، نگهداری و بهره‌برداری از سیستم‌ها ضروری است [4]. با این حال، روش‌های سنتی ارزیابی قابلیت اطمینان اغلب مبتنی بر داده‌های خرابی در طول زمان هستند که جمع‌آوری آن‌ها در خصوص محصولات با طول عمر بالا بسیار زمان‌بر و پرهزینه است [5].

از سوی دیگر، در مدت زمان محدود تست، ممکن است هیچ خرابی مشاهده نشود که این امر باعث خطا در برآورد قابلیت اطمینان می‌شود [4]. در سال‌های اخیر، با توجه به پیچیده‌تر شدن محصولات و افزایش رقابت جهانی، اهمیت دستیابی به برآوردهای دقیق‌تر از قابلیت اطمینان، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است [6]. محصولات با قابلیت اطمینان بالا در حوزه‌هایی چون هوافضا، مخابرات و تجهیزات نظامی به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای این محصولات، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها، پیش‌بینی طول عمر و نحوه تخریب آن‌ها در شرایط واقعی است [7]. هرچند تحلیل داده‌های خرابی روش مناسبی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان است، اما جمع‌آوری داده‌های واقعی برای محصولاتی با طول عمر بالا، مستلزم صرف زمان زیاد بوده و عملاً ناکارآمد است [8]. در این راستا، مهندسان به استفاده از آزمون‌های تسریع شده¹ و آزمون‌های تنزل کارکرد² روی آورده‌اند. این آزمون‌ها با ایجاد شرایط حادثه‌تر از واقعیت، به شبیه‌سازی فرآیندهای تخریب و استخراج سریع‌تر داده‌های مربوط به طول عمر و قابلیت اطمینان محصول کمک می‌کنند [6]، [9]. هدف از این روش‌ها، شناسایی مکانیزم‌های خرابی تحت تأثیر تنش و دما و استفاده از آن‌ها در مدل‌سازی قابلیت اطمینان و کاهش زمان توسعه محصول است. با کوتاه شدن چرخه عمر توسعه محصولات و افزایش فشار بازار برای ارائه محصولات قابل اعتماد در زمان کوتاه، آزمون‌های شتاب‌یافته به یکی از ابزارهای کلیدی در فرآیند طراحی و تولید تبدیل شده‌اند [10].

نتایج این آزمون‌ها به مهندسان کمک می‌کند تا استراتژی‌های نگهداری، بازرسی و تعویض را به صورت دقیق‌تری تنظیم کنند [11]. همچنین تحلیل فرآیندهای خرابی و توزیع‌های آماری طول عمر، امکان بازنگری طراحی و بهبود قابلیت اطمینان را فراهم می‌آورد [12]. به ویژه برای محصولاتی که به تازگی طراحی شده‌اند، تخمین توزیع طول عمر به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان ضروری است [13].

در پژوهش حاضر، تلاش شده است مدلی تلفیقی از آزمون‌های *ALT* و *ADT* برای محاسبه طول عمر نازل یک موتور توربینی هواپیما ارائه شود. نازل، به عنوان یکی از اجزای حساس این موتورها، تحت تنش‌های حرارتی و مکانیکی شدید قرار می‌گیرد و از این رو، تحلیل دقیق رفتار و طول عمر آن در شرایط عملیاتی، از اهمیت بالایی برخوردار است. نوآوری این تحقیق در آن است که برای نخستین بار، ترکیب سیستماتیک دو نوع آزمون شتاب‌یافته و تنزل کارکرد برای این نوع قطعه طراحی و اجرا شده است. استفاده از داده‌های حاصل از آزمون *ADT* به عنوان ورودی آزمون *ALT*، امکان بهبود دقت مدل نهایی و افزایش صحت پیش‌بینی‌ها را فراهم کرده است. نتایج حاصل از این مدل تلفیقی می‌تواند به کاهش قابل توجه زمان و هزینه‌های آزمون در فرآیند طراحی و ساخت کمک کند و به عنوان ابزار تصمیم‌گیری موثر برای صنایع نظامی و هوافضا در طراحی نازل‌هایی با قابلیت اطمینان و عملکرد بهینه مورد استفاده قرار گیرد. پیاده‌سازی این مدل بر روی نازل یک موتور توربینی تحت شرایط واقعی، نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از قابلیت تعمیم به دیگر کاربردهای صنعتی و نظامی نیز برخوردار است و می‌تواند نقش مهمی در ارتقا کیفیت و عملکرد محصولات ایفا نماید [12-14].

¹ Accelerated Life Testing (ALT)

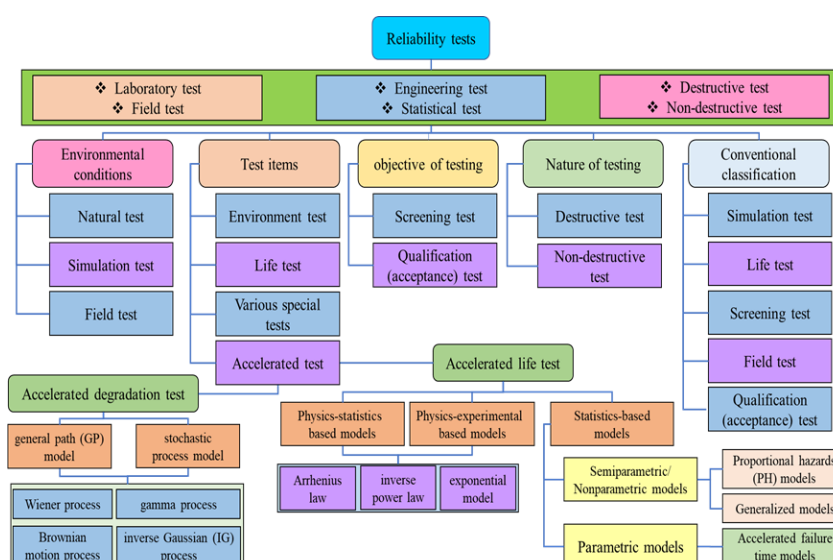
² Accelerated Degradation Testing (ADT)

۲- مبانی نظری پیشینه تحقیق

۲-۱- آزمون‌های قابلیت اطمینان در محصولات مکانیکی

قابلیت اطمینان محصولات مکانیکی یکی از مهم‌ترین ابعاد طراحی، تولید و بهره‌برداری محسوب می‌شود، چراکه این محصولات در سراسر چرخه عمر خود، از طراحی تا اسقاط، در معرض عوامل محیطی گوناگون نظیر تنش‌های فیزیکی، شیمیایی و آب‌وهوایی قرار دارند که می‌توانند عملکرد آن‌ها را مختل کنند [15]. در همین راستا، آزمون‌های قابلیت اطمینان به منظور بررسی و ارزیابی رفتار محصول در برابر این عوامل طراحی شده‌اند. این آزمون‌ها در سه مرحله اصلی تحقیق و توسعه^۱، تولید آزمایشی و تولید انبوه انجام می‌شوند و نقش مهمی در شناسایی نقاط ضعف طراحی، مواد اولیه، فرآیند تولید و قطعات دارند.

آزمایش قابلیت اطمینان شامل دسته‌بندی‌های مختلفی است: آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی، مهندسی و آماری، مخرب و غیرمخرب [15]. آزمایش‌های مهندسی مانند آزمون غربالگری استرس محیطی^۲ و آزمون رشد قابلیت اطمینان، بر شناسایی و اصلاح نقص‌ها متمرکزند، در حالی که آزمون‌های آماری مانند تعیین و انطباق قابلیت اطمینان، برای ارزیابی کمی عملکرد محصول طراحی شده‌اند. همچنین، آزمایش‌هایی چون آزمون عمر تسریع‌شده^۳ در مرحله طراحی و آزمون دوام برای تعیین طول عمر محصول، از ابزارهای کلیدی در مهندسی قابلیت اطمینان هستند [16]. از آنجا که داده‌های مربوط به عمر و خرابی محصولات مکانیکی به طور نسبی محدودند، تحقیقات مهندسی قابلیت اطمینان بیشتر بر پایه تحلیل‌های نظری و آزمایشگاهی استوار است؛ بنابراین، نیاز به جمع‌آوری بلندمدت و دقیق داده‌های آزمایشگاهی و میدانی وجود دارد تا پایگاه داده‌ای جامع برای ارتقای قابلیت اطمینان محصولات ایجاد شود. در نهایت، آزمون‌های قابلیت اطمینان به طراحان و مهندسان این امکان را می‌دهند تا پیش از عرضه، از عملکرد پایدار و ایمن محصولات اطمینان حاصل کنند و بدین ترتیب از بروز خرابی‌های زود هنگام، هزینه‌های تعمیر و رضایت پایین مشتری جلوگیری شود [15]. به طور کلی دسته‌بندی آزمون‌های قابلیت اطمینان به صورت شکل ۱ است که به طور خلاصه آزمون‌های قابلیت اطمینان به سه دسته اصلی و پنج دسته فرعی قابل دسته‌بندی هستند.



شکل ۱- دسته‌بندی آزمون‌ها [15].

Figure 1- Classification of Tests [15].

¹ Research and Development (R&D)

² Environmental Stress Screening (ESS)

³ Highly Accelerated Life Test (HALT)

۲-۲- آزمون سوزاندن آزمایشی و آزمون خودکار داخلی در ارزیابی قابلیت اطمینان

آزمون سوزاندن آزمایشی^۱ یکی از روش‌های متداول در ارزیابی قابلیت اطمینان مولفه‌ها است که برای غربالگری مولفه‌های ضعیف‌تر قبل از شروع دوره عملکرد اصلی به کار می‌رود. در این روش، قطعات تحت تنش‌هایی فراتر از شرایط عملیاتی معمولی، مانند دمای ۸۰ درجه فارنهایت با رطوبت نسبی ۸۰٪، برای مدت‌زمان ۲۴ تا ۴۸ ساعت قرار می‌گیرند [17]. هدف اصلی این آزمون حذف مولفه‌هایی است که در مرحله اولیه عمر (منطقه خرابی اولیه منحنی وان) احتمال خرابی بیشتری دارند. توزیع زمان خرابی در این آزمون اغلب به صورت ترکیبی از دو توزیع مجزا مدل می‌شود: یکی برای مولفه‌های ضعیف و دیگری برای مولفه‌های سالم. اثربخشی سوزاندن آزمایشی به ماهیت نرخ خرابی بستگی دارد. برای مولفه‌هایی که نرخ خرابی کاهشی دارند (مانند توزیع وایبول با پارامتر شکل $\gamma < 1$)، سوزاندن آزمایشی می‌تواند قابلیت اطمینان و عمر باقیمانده را بهبود بخشد؛ اما برای مولفه‌هایی با نرخ خرابی ثابت، این تاثیر مشاهده نمی‌شود، زیرا معادله قابلیت اطمینان بعد از سوختن ثابت باقی می‌ماند:

$$R\left(\frac{t}{T}\right) = \frac{R(t+T)}{R(T)}, \quad (1)$$

$$R\left(\frac{t}{T}\right) = \frac{e^{-\lambda(t+T)}}{e^{-\lambda T}} = R(T).$$

یکی از چالش‌های اصلی، تعیین زمان بهینه آزمون است که هزینه کلی محصول را در طول چرخه عمر کاهش دهد. زمان سوختن کوتاه ممکن است به خرابی‌های زود هنگام و افزایش هزینه‌های عملیاتی منجر شود، در حالی که زمان طولانی منجر به افزایش هزینه تست و تاخیر در تولید خواهد شد. تابع هزینه مورد انتظار به صورت زیر بیان شده است [18]:

$$E(C) = C_b T + C_0 [R(T) - R(T+t)] + C_f [1 - R(T)], \quad (2)$$

که در آن

C_b : هزینه تست به ازای هر مولفه

C_0 : هزینه خرابی در عمر عملیاتی

C_f : هزینه خرابی در حین تست

آزمون خودکار داخلی^۲ نیز روشی است که از قابلیت‌های داخلی سخت‌افزار و نرم‌افزار برای اجرای تست بهره می‌برد. کنترلر، الگوهای تست را تولید کرده، مدار را بررسی کرده و نتایج را تحلیل می‌کند. از این روش در تجهیزاتی که باید برای مدت‌زمان طولانی بدون استفاده ذخیره شوند (مانند موشک‌ها) استفاده می‌شود. چالش‌هایی مانند تعیین دفعات انجام آزمون و اثرات پیری مولفه‌ها در این نوع تست حایز اهمیت هستند [19].

۲-۳- آزمون‌های تسریع شده و مدل‌های پیش‌بینی قابلیت اطمینان

ALT با هدف تسریع خرابی مولفه‌ها در شرایط تنش شدیدتر نسبت به محیط عملیاتی، برای صرفه‌جویی در زمان و پیش‌بینی عملکرد محصول در میدان استفاده می‌شوند. AT در فرآیند طراحی، توسعه و ارزیابی قابلیت اطمینان محصولات، مخصوصاً در محصولات با نرخ خرابی پایین، نقشی کلیدی دارد. در این آزمون‌ها، شناخت درست از مکانیسم‌های خرابی و روابط $life-stress$ ضروری است [12]. دو نوع اصلی AT عبارتند از:

¹ Burn-In Test

² Built-In Self-Test (BIST)

ALT: برای محصولاتی با خرابی سخت و مشهود. از زمان‌های خرابی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان تحت شرایط معمول استفاده می‌شود.

آزمون تنزل کارکرد^۱: برای محصولاتی که پیش از خرابی کامل، نشانه‌هایی از کاهش عملکرد نشان می‌دهند. مسیر تخریب پایش و مدل‌سازی می‌شود تا آستانه شکست مشخص گردد [20]، [21].

مدل‌های شتاب-عمر به پیش‌بینی عملکرد کمک می‌کنند:

۱. مدل آرنیوس: رابطه دما با نرخ واکنش، برای آزمون‌های حرارتی (مانند پلیمرها و باتری‌ها) [22].

۲. مدل معکوس قانون توان: برای تنش‌های غیرحرارتی مانند ولتاژ، فشار، یا بار مکانیکی.

۳. مدل ایرینگ: ترکیبی از دما و سایر عوامل تنش غیرحرارتی.

مدل آرنیوس به‌صورت

$$TF = A_0 \exp\left(\frac{Q}{K_B T}\right). \quad (3)$$

و مدل معکوس توان به‌صورت

$$TF = B_0 \xi^{-n}. \quad (4)$$

ضریب شتاب^۲ به‌عنوان نسبت زمان خرابی در شرایط نرمال به زمان در شرایط تنش تعریف می‌شود.

$$AF = \frac{TF_{operation}}{TF_{stress}}, \quad (5)$$

$$TF_{operation} = AF \times TF_{stress}.$$

در مدل ایرینگ، AF به‌صورت ترکیبی از دما و تنش غیرحرارتی محاسبه می‌شود [23]، [24].

$$AF = \left(\frac{\xi_{stress}}{\xi_{op}}\right)^n \exp\left[\frac{Q}{K_B} \left(\frac{1}{T_{op}} - \frac{1}{T_{stress}}\right)\right]. \quad (6)$$

اطلاعات حاصل از ALT اغلب شامل داده‌های سانسور شده (زمان یا خرابی) هستند و انتخاب مدل مناسب برای توزیع طول عمر بر اساس ویژگی‌های محصول، تنش و اهداف آزمون بسیار حایز اهمیت است. موفقیت در AT مستلزم طراحی دقیق، استفاده از FMEA، داده‌های گارانتی و دانش مهندسی برای تعیین متغیرهای تنش موثر و مدل‌سازی دقیق عمر محصول است [5]، [25]، [26].

۴-۲- نازل‌ها و تاثیر آن‌ها بر عملکرد موتورهای جت

نازل‌های موتورهای جت توربینی به‌طور کلی به دودسته اصلی تقسیم می‌شوند: نازل‌های همگرا و نازل‌های همگرا-واگرا. نازل‌های همگرا ساده‌ترین نوع هستند که جریان را به حداکثر سرعت ۱ ماخ می‌رسانند و معمولاً در کاربردهای سرعت کم و زیر صوت استفاده می‌شوند. برای سرعت‌های بالاتر و افزایش انبساط گازها، از نازل‌های همگرا-واگرا استفاده می‌شود که جریان را در گلوگاه به ۱ ماخ رسانده و سپس به سرعت‌های بیشتر در ناحیه واگرا می‌رسد. این نازل‌ها در کاربردهای با سرعت بالا، مانند موتورهای که فشار بالایی تولید می‌کنند، استفاده می‌شوند. انواع دیگر نازل‌ها

¹ Alkali Denaturation Test (ADT)

² Acceleration Factor (AF)

شامل نازل اجکتور، نازل پلاگ و نازل تک رمپ انبساطی هستند [27]. با پیشرفت فناوری، نازل‌هایی با خروجی مستطیلی طراحی شدند که به راحتی می‌توانند جریان خروجی را منحرف کرده و کنترل بهتری بر تراست ایجاد کنند. نازل‌های دو بعدی که دارای این ویژگی‌ها هستند، علاوه بر تولید تراست در محور موئور، قادر به تغییر جهت تراست و تولید نیرو در جهات مختلف نیز می‌باشند. این نازل‌ها به هواپیماهای نظامی امکان می‌دهند که در سرعت‌های مختلف، جهت تراست را به سمت بالا یا پایین تغییر دهند و به‌نوعی مانور پذیری بیشتری بدهند [28]. سیستم کنترل جهت تراست داخلی به دو نوع دو بعدی و سه بعدی تقسیم می‌شود. در روش‌های دو بعدی، تغییر جهت تراست در یک صفحه مشخص (مانند صفحه پیچ پرنده) اتفاق می‌افتد. این نازل‌ها می‌توانند دایروی یا غیردایروی باشند. در روش‌های سه بعدی، کنترل بردار رانش به‌صورت سه‌بعدی انجام می‌شود و می‌توان گشتاور پیچ و یاو ایجاد کرد. این روش‌ها نیاز به تغییرات در نازل، قطعات متحرک و عملگرهای نصب شده دارند. نسبت به سیستم‌های خارجی، سیستم‌های داخلی از مزایای کاهش سطح مقطع راداری و پیچیدگی ساخت کم‌تر برخوردارند، اما به دلیل نیاز به مواد خاص، هزینه‌بر و پیچیده هستند.

همچنین، در سیستم‌های داخلی مشکلاتی در زمینه خنک‌کاری نازل و کاهش دمای خروجی وجود دارد [29]. در مقایسه بین نازل‌های دو بعدی و سه بعدی، نازل‌های سه بعدی به دلیل پیچیدگی‌های جریان و افت‌های بیشتر در آیرودینامیک، بازده کمتری دارند. همچنین، در نازل‌های سه بعدی، ساختارهای سازه‌ای به دلیل نیاز به چرخش در سه جهت دچار شکستگی‌های بیشتری می‌شوند. نازل‌های دو بعدی نسبت به این نوع از نظر یکپارچگی ساختاری، بازده آیرودینامیکی و قابلیت بقا مزایای بیشتری دارند. از طرفی، نازل‌های سه بعدی به دلیل توانایی تغییر بردار رانش در سه جهت، عملکرد پیشرانشی بهتری دارند؛ اما مشکلاتی در زمینه یکپارچگی بدنه ایجاد می‌کنند. از نظر پنهان‌کاری راداری، نازل‌های دو بعدی برتری دارند، در حالی که نازل‌های سه بعدی در مانور پذیری برتر هستند. انتخاب بین این دو نوع نازل بستگی به استراتژی و نوع عملیات طراحی جنگنده‌ها دارد [28].

نازل‌های دایروی معمولاً عملکرد آیرودینامیکی بهتری دارند و جریان با افت کمتری مواجه می‌شود. در حالی که نازل‌های مستطیلی به دلیل یکپارچگی بیشتر با بدنه، سطح مقطع راداری کمتری دارند، اما از لحاظ پیشرانشی و یکپارچگی ساختاری در مقایسه با نازل‌های دایروی دارای مشکلات بیشتری هستند. نازل‌های مستطیلی همچنین به دلیل پیچیدگی‌های بیشتر، از نظر وزن و هزینه‌های نگهداری سنگین‌تر هستند. در حالی که نازل‌های دایروی هزینه‌های بیشتری دارند، از لحاظ پیشرانشی و آیرودینامیکی به دلیل طراحی بهینه، بازده بهتری را ارائه می‌دهند.

۳- پیشینه تحقیق

نلسون [30] روش‌هایی برای طراحی *ALT* بر اساس یک مدل ساده شرح داده است. وی همچنین اولین کسی بود که کاربردها و مدل‌هایی برای آزمون‌های تنزل کارکرد با استفاده از رابطه آرنیوس بررسی و معرفی کرد. او ایده‌ی آزمون‌های شتاب‌یافته برنامه‌ریزی شده به‌منظور دستیابی به بهترین دقت با استفاده از تعداد واحد آزمون محدود را نیز مطرح کرد [30]. از آن پس، تجزیه و تحلیل سیستماتیک آزمون‌های *ADT* توسعه یافت و مطالعات بعدی بر پایه این مفاهیم گسترش یافتند.

کری و کوپینگ [31] استراتژی تحلیل داده‌ها و مدلی برای استخراج اطلاعات قابلیت اطمینان از مشاهدات تخریب در دستگاه‌های منطقی یکپارچه را که در کابل‌های زیردریایی نسل جدید استفاده می‌شدند معرفی کردند. لو و میکر [21] روش برآورد زمان خرابی از داده‌های تنزل را توسعه دادند و نحوه استفاده از این داده‌ها در تحلیل قابلیت اطمینان را تبیین کردند. بولانگر و اسکو بار [32] طراحی ساختار یافته آزمون‌های *ADT* را ارائه دادند و به مسایل کلیدی مانند تعیین سطح تنش و اندازه نمونه در زمان آزمون پایان یافته پرداختند.

در ادامه، تویاس و ترینداد [33] از روش‌های ساده رگرسیون خطی بر داده‌های تخریب استفاده کردند تا به تحلیل بهتری از عملکرد دست یابند. تی‌سنگ و یو [34] روشی برای تعیین بهینه زمان توقف در آزمون‌های *ADT* ارائه کردند و در سال ۱۹۹۹ نیز روش‌هایی برای انتخاب اندازه نمونه و

زمان آزمایش را شرح دادند. نلسون [30] همچنین روش‌ها و مدل‌های اولیه برای تحلیل داده‌های آزمون تخریب مخرب شتاب‌یافته¹ را معرفی کرد [30]. اسکو بار و همکاران [35] این مفهوم را توسعه دادند و کاربرد *ADDT* را برای ارزیابی چسب‌ها توضیح دادند. در این آزمون‌ها، مقاومت اتصال در طول زمان مورد ارزیابی قرار گرفت و چون اندازه‌گیری مخرب بود، تنها یک بار امکان سنجش وجود داشت. سانچز و پن [36] به مدل‌سازی تخریب تصادفی با توزیع نرمال و تخمین پارامترها از طریق روش حداکثر احتمال پرداختند و با ارایه یک مثال عددی، رویکرد خود را تشریح کردند. چن و یوان [5] نیز از مدل مخاطرات تخریب برای ارزیابی قابلیت اطمینان مقاومت کربنی در آزمون‌های *ADT* بهره بردند و از مدل آرنیوس و توزیع وایبول برای تحلیل داده‌ها استفاده کردند. پارامترها با روش‌های حداکثر احتمال و نیوتن-رافسون تخمین زده شدند. شن و همکاران [7] آزمون‌های *ADT* را برای سیستم‌هایی با چندین پارامتر عملکرد مدل‌سازی کردند و برای بررسی وابستگی میان پارامترها از ماتریس واریانس-کوواریانس و روش حداقل مربعات استفاده کردند. در همین سال، وانگ و همکاران [8] تحلیل *ADT* را با روش زنجیره مارکوف مونت کارلو² انجام دادند. آن‌ها برای دیودهای فوق درخشانده³ از دما و نور خروجی به عنوان عامل تنش و پارامتر تخریب استفاده کردند و با مدل حرکت بروانی طول عمر و قابلیت اطمینان را تحلیل کردند [9]. وانگ و همکاران [8] نیز از روش بیزین برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان دیود *SLD* با در نظر گرفتن پارامترهای محیطی استفاده کردند [8]. السید [11] مفاهیم گسترده‌ای در زمینه آزمون‌های شتاب‌یافته و مدل‌های آن ارایه داد.

کالینز و همکاران [10] نشان دادند که ارتباط بین *ALT* و تحلیل آماری می‌تواند به تخمین و رشد قابلیت اطمینان کمک کند. یه و همکاران [6] آزمون‌های *ADT* را در شرایط تنش ثابت برای تخریب با پیروی از فرآیند معکوس گاوسی طراحی کردند و آن را به صورت عددی ارزیابی نمودند. همچنین، پنگ و همکاران [2] یک چارچوب بیزین برای تحلیل داده‌های تخریب با مدل‌های فرآیند معکوس گاوسی پیشنهاد دادند. در راستای توسعه مدل‌های تحلیل نوین، لیمون و همکاران [12] راهبردهای مختلف آزمون شتاب‌یافته را دسته‌بندی کرده و با دلایل متعدد مانند کاهش هزینه، سرعت توسعه محصول و طراحی با قابلیت اعتماد بالا، بر لزوم استفاده از آزمون‌های شتاب‌یافته تاکید کردند. در همین سال، وانگ و همکاران [13] معیار جدیدی برای طراحی *ADT* ارایه دادند که به جای تاکید صرف بر دقت آماری، بر حفظ مکانیسم تخریب واقعی تمرکز داشت. نتایج نشان داد که با اعمال این معیار، پراکندگی داده‌ها کاهش می‌یابد و دقت برآورد افزایش می‌یابد. در حوزه مدل‌های ترکیبی، دینگ و همکاران [37] یک مدل جدید *ADT* با بخش ناپارامتریک برای مسیر تخریب و بخش پارامتریک برای شتاب‌دهندگی معرفی کردند. این مدل هم مکانیسم تخریب را حفظ می‌کند و هم با انعطاف‌پذیری بالا قابلیت برازش دقیق‌تری دارد. چو و همکاران [38] نیز مدلی غیرخطی برای مسیرهای تخریب با متغیرهای کمکی پویا معرفی کردند که برای تحلیل محیط‌های پیچیده مناسب بود.

شیانو و یه [39] مدلی برای تحلیل آزمون‌های مخرب با مقدار اولیه تخریب توسعه دادند و عملکرد مطلوب آن را در برازش مسیرهای تخریب اثبات کردند. چن و همکاران [40] به طور جامع به مرور روش‌های آزمون تخریب غیرمخرب و مخرب پرداخت و مقایسه‌ای میان انواع آزمون‌ها و کاربردهای آن‌ها ارایه کرد. پژوهش رز و همکاران [41] به بررسی جامع روش‌های مختلف آزمون تسریع شده در سیستم‌های قدرت سیال پرداخته است. این مقاله تاکید می‌کند که آزمون‌های تسریع شده با هدف شبیه‌سازی سریع تر فرآیندهای خرابی و کاهش زمان تست‌های طولانی، برای قطعات پیچیده‌ای مانند پمپ‌ها، شیرها و مهر و موم‌ها بسیار حیاتی هستند. با وجود کاربرد گسترده این آزمون‌ها، چالش اصلی در تعیین دقیق شرایط تسریع و تحلیل مکانیزم‌های خرابی است که می‌تواند بر دقت پیش‌بینی طول عمر تاثیرگذار باشد. این بررسی نشان می‌دهد که تلفیق آزمون‌های *ALT* و *ADT* و به کارگیری مدل‌های ترکیبی می‌تواند راهکار مناسبی برای بهبود دقت تخمین طول عمر باشد؛ موضوعی که در این پژوهش نیز مورد توجه قرار گرفته است. مقاله ژو و همکاران [42] رویکردی نوین برای طراحی آزمون‌های تخریب شتاب‌یافته با بهره‌گیری از نظریه بازی‌های چندهدفه ارایه داده است. این مدل با هدف بهینه‌سازی دقت پیش‌بینی طول عمر و برآورد پارامترها، محدودیت‌های منابع را در طراحی آزمون لحاظ می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که طراحی تلفیقی آزمون‌ها می‌تواند به تخمین‌های دقیق‌تر و کارایی بالاتر منجر شود؛ رویکردی که مکمل و الهام‌بخش روش پیشنهادی این پژوهش نیز می‌باشد.

¹ Accelerated Destructive Destruction Test (ADDT)

² Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method

³ Super Luminous Diode (SLD)

۴- روش تحقیق

در این پژوهش، برای برآورد طول عمر نازل موتور توربینی، از یک رویکرد ترکیبی شامل دو نوع آزمون قابلیت اطمینان، یعنی *ADT* و *ALT*، استفاده شده است. فرآیند تحقیق در چهار مرحله اصلی به شرح زیر انجام شده است:

طراحی و اجرای آزمون *ADT*

در مرحله نخست، آزمون *ADT* برای بررسی روند تخریب مولفه بحرانی نازل طراحی شد. در این آزمون، نازل‌ها در سطوح مختلف دما (سه سطح دمایی مشخص) و در بازه‌های زمانی مشخص تحت شرایط تنش قرار گرفتند. در پایان هر بازه زمانی، میزان پارامتر تخریب (مانند تغییر خاصیت مکانیکی یا ابعادی) اندازه‌گیری گردید. هدف از این مرحله، بررسی رابطه بین زمان و نرخ تخریب در شرایط تسریع شده بود.

تحلیل داده‌های آزمون *ADT* و تخمین زمان خرابی

با استفاده از داده‌های به‌دست آمده، مدل ریاضی تخریب برازش شد. از مدل توان برای تخمین مسیر تخریب پارامتر در طول زمان استفاده گردید. سپس با در نظر گرفتن سطح آستانه‌ی تخریب، زمان‌های متناظر با وقوع خرابی برآورد شدند. این داده‌ها مبنای مرحله بعد قرار گرفتند.

طراحی و اجرای آزمون شتاب‌یافته

پس از تخمین زمان خرابی در شرایط مختلف دما، از رابطه آرنیوس برای مدل‌سازی تاثیر دما بر نرخ خرابی استفاده شد. پارامترهای مدل آرنیوس شامل انرژی فعال‌سازی و ضریب شتاب برآورد گردید. سپس آزمون *ALT* در دماهای بالا و تنش‌های تسریع شده اجرا شد و زمان‌های واقعی خرابی نمونه‌ها در این شرایط ثبت شد.

ترکیب داده‌های *ADT* و *ALT* و مدل‌سازی قابلیت اطمینان

در مرحله نهایی، داده‌های حاصل از هر دو آزمون ترکیب شد و با استفاده از روش‌های آماری، از جمله برآورد حداکثر احتمال^۱، مدل قابلیت اطمینان کلی نازل استخراج گردید. همچنین، توزیع مناسب برای داده‌های طول عمر شناسایی و برازش شد (نظیر وایبول یا لوگ نرمال). طول عمر نازل در شرایط عملیاتی بر این اساس برآورد گردید. لازم به ذکر است که در این رویکرد، آزمون *ADT* و *ALT* به‌صورت وابسته و تعاملی طراحی شده‌اند، به‌گونه‌ای که نتایج *ADT* به‌عنوان مبنایی برای تعیین شرایط آزمون *ALT* (از جمله پارامترهای مدل آرنیوس) مورد استفاده قرار گرفته و در نهایت، داده‌های حاصل از هر دو آزمون به‌صورت ترکیبی برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان نهایی نازل استفاده شده‌اند.

۵- بحث و یافته‌ها

۵-۱- طراحی آزمون شتاب‌یافته در تنش ثابت

از آنجا که پارامتر تخریب *S* (خزش قطعه) از نوع خرابی نرم می‌باشند، ما از تلفیق آزمون عمر شتاب‌یافته و آزمون تنزل کارکرد برای به‌دست آوردن داده‌های واقعی طول عمر در تنش‌های شتاب‌یافته استفاده می‌کنیم. لازم به ذکر است در آزمون تنزل کارکرد هیچ قطعه‌ای خراب نمی‌شود. عوامل مهم تخریب مواد می‌توانند با معادله قانون توان مدل‌سازی شود که به‌صورت زیر می‌باشد:

¹ Maximum Likelihood Estimation (MLE)

$$S = S_0[1 \pm A_0 t]^m. \quad (۷)$$

مدل شتاب-عمر برای دما در آزمون عمر شتاب یافته، مدل آرنیوس می باشد که به صورت زیر است:

$$TF = A_0 \exp \left[\frac{Q}{K_B T} \right] \quad (۸)$$

که در آن TF طول عمر سیستم در دمای T (برحسب کلوین) است. A_0 پارامتر وابسته به دستگاه و K_B ثابت بولتزمن و Q پارامتر ثابت است که مجهول می باشد. با حل معادله S برای زمان، به دست می آوریم:

$$t = \left[\frac{1}{\pm A_0} \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right) \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (۹)$$

زمان منتهی به خرابی ($t=TF$) هنگامی رخ می دهد که تغییرات ویژگی مواد توسط مقدار کلیدی آن دیگر به درستی نقش خود را انجام ندهد:

$$TF = \left[\frac{1}{\pm A_0} \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right) \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (۱۰)$$

می توان از معادله بالا دید که TF با افزایش مجاز مقدار کلیدی و ویژگی تخریب افزایش می یابد. همچنین TF با کاهش توان m ، افزایش پیدا می کند. TF هنگامی که m به سمت صفر می رود، به بی نهایت میل می کند. $M=0$ بدان معنی است که هیچ تخریبی با گذشت زمان رخ نمی دهد؛ بنابراین، TF تا بی نهایت می رود.

۲-۵- انتخاب الگوی بارگذاری تنش

برای آزمون تنزل کارکرد باید توجه داشته باشیم که آزمون حداقل باید در دو سطح تنش انجام شود؛ بنابراین، الگوهای بارگذاری تنش برای آزمون تنزل کارکرد بر اساس نظر خبرگان به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

۱. برای حالت افزایش دما، سطوح تنش ثابت و برابر با ۶۵۰ و ۷۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتی گراد می باشد.

۲. برای حالت افزایش زمان، سطوح تنش ثابت و برابر با ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت می باشد.

در آزمون عمر شتاب یافته و آزمون تنزل کارکرد برای سادگی کار و دقت برآورد بهتر هنگام تغییر سطوح تنش هر یک از عوامل تنش، دیگر عوامل را در سطح تنش عملیاتی ثابت نگه می داریم.

۳-۵- تعیین پارامترهای ثابت و داده های طول عمر

برای تعیین پارامترهای ثابت، ابتدا باید از معادله زیر لگاریتم طبیعی ($\ln$) گرفته تا معادله به صورت خطی شوند:

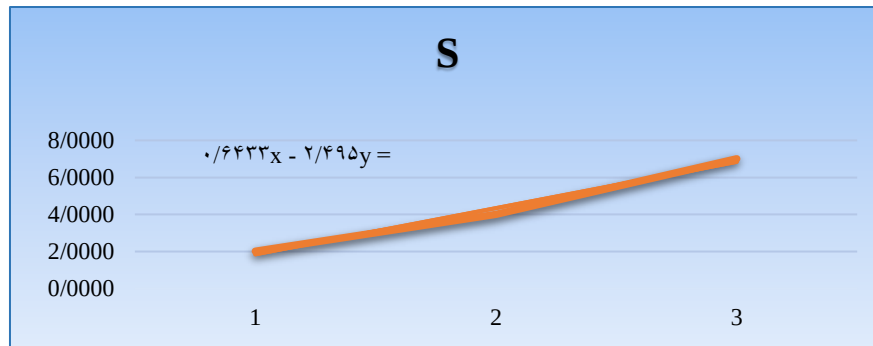
$$TF = A_0 \exp \left[\frac{Q}{K_B T} \right] \quad (۱۰)$$

$$\ln TF = \ln A_0 + \frac{Q}{K_B T}. \quad (۱۱)$$

در این معادلات $\ln(TF)$ به ترتیب با پارامترهای مجهول Q ، $\ln(A_0)$ رابطه خطی دارد. با رسم نمودار $\frac{1}{K_B T}$ برحسب $\ln(TF)$ و به دست آوردن شیب خط مقدار مجهول Q به دست می آید.

۴-۵- پیاده سازی آزمون تلفیقی طراحی شده بر اساس الگوهای بارگذاری تنش

آزمون تنزل کارکرد در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت و در سه دمای ۶۵۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ درجه سانتی گراد و با سه تکرار در هر آزمایش انجام و مقدار مولفه کلیدی S برآورد شده است. با استفاده از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار اول در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت نمودار شکل ۲ رسم شده و مقادیر AO و m با استفاده از شیب و عرض از مبدا نمودار مشخص و از آن‌ها جهت محاسبه مقدار TF استفاده گردیده است.



شکل ۲- نمودار مقدار S در تکرار اول در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد.

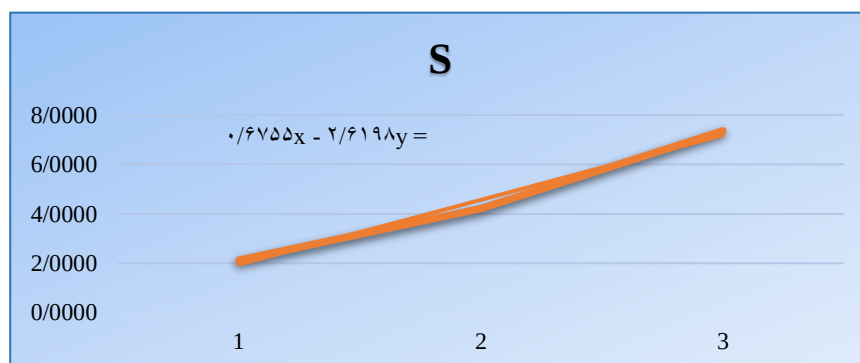
Figure 2- The graph of S value during the first cycle at 650 °C.

جدول ۱- داده های تکرار اول آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد.

Table 1- First repetition data of the degradation test at three time intervals under 650 °C temperature condition.

T1= 650 °C = 923.15 (K)	
زمان (h)	طول عمر (h)
500h	0.0000
1000h	1.2864
1500h	1.8596

نمودار شکل ۳ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار دوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار مقدار S در تکرار دوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد.

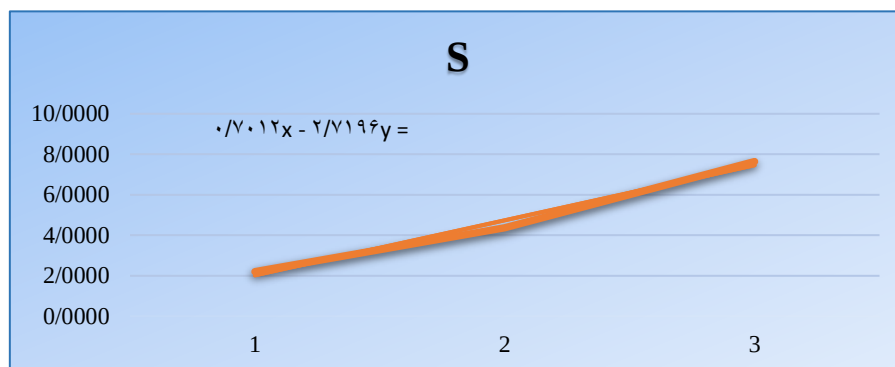
Figure 3- S value versus time in the second repetition at 650 °C.

جدول ۲- داده های تکرار دوم آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد.

Table 2- Second repetition data of the degradation test at three time intervals under 650 °C temperature condition.

T1= 650 °C = 923.15 (K)	
زمان (h)	طول عمر (h)
500h	0.0000
1000h	1.2868
1500h	1.8277

نمودار شکل ۴ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار سوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار مقدار S در تکرار سوم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد.

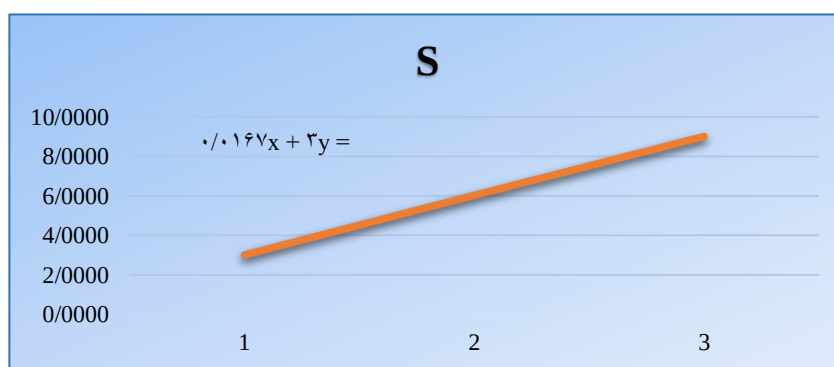
Figure 4- S value versus time in the third repetition at 650 °C.

جدول ۳- داده های تکرار سوم آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد.

Table 3- Third repetition data of the degradation test at three time intervals under 650 °C temperature condition.

T1= 650 °C = 923.15 (K)	
طول عمر (h)	زمان (h)
0.0000	500h
1.2871	1000h
1.8048	1500h

نمودار شکل ۵ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار اول در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار مقدار S در تکرار اول در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد.

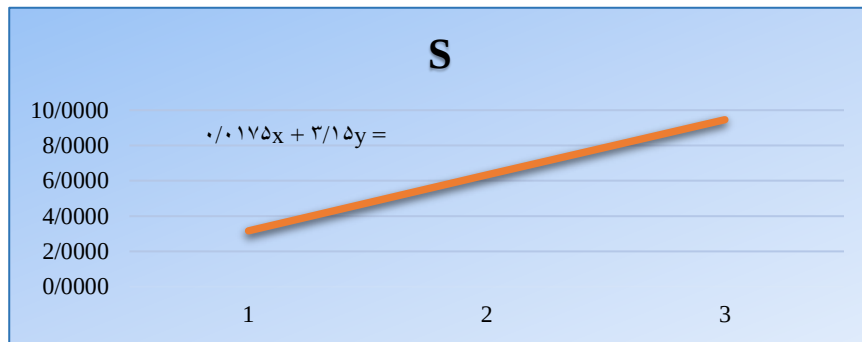
Figure 5- S value versus time in the first repetition at 700 °C.

جدول ۴- داده های تکرار اول آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد.

Table 4- First repetition data of the degradation test at three time intervals under 700 °C temperature condition.

T1= 700 °C = 923.15 (K)	
طول عمر (h)	زمان (h)
0.0000	500h
0.9956	1000h
1.2516	1500h

نمودار شکل ۶ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار دوم در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۵ نشان داده شده است.



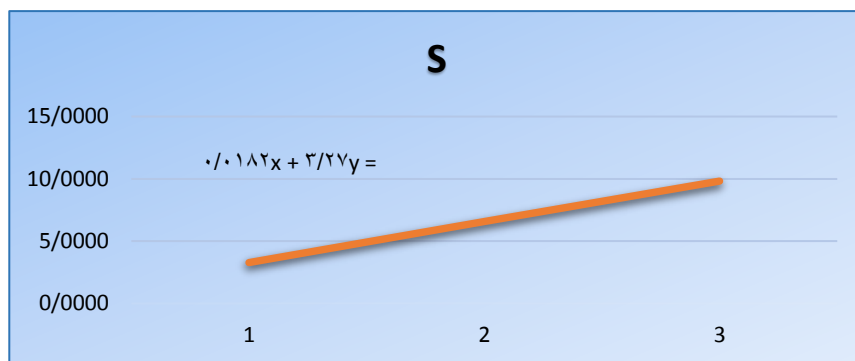
شکل ۶- نمودار مقدار S در تکرار دوم در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد.
Figure 6- S value versus time in the second repetition at 700 °C.

جدول ۵- داده های تکرار دوم آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد.

Table 5- Second repetition data of the degradation test at three time intervals under 700 °C temperature condition.

T1= 700 °C = 923.15 (K)	
زمان (h)	طول عمر (h)
500h	0.0000
1000h	0.9955
1500h	1.2379

نمودار شکل ۷ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار سوم در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۶ نشان داده شده است.



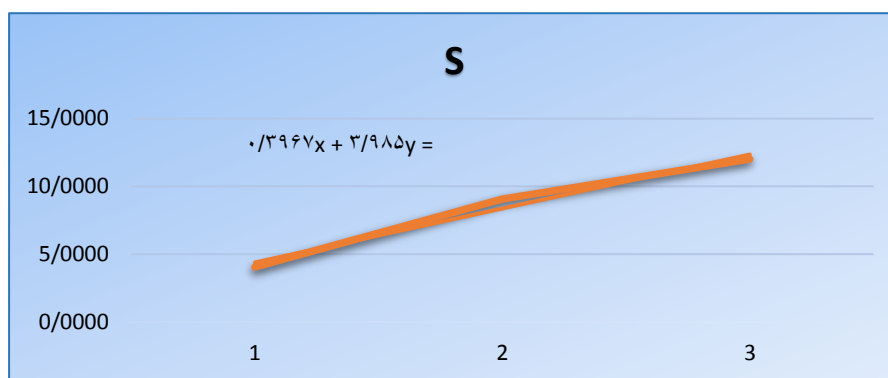
شکل ۷- نمودار مقدار S در تکرار سوم در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد.
Figure 7- S value versus time in the third repetition at 700 °C.

جدول ۶- داده های تکرار سوم آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد.

Table 6- Third repetition data of the degradation test at three time intervals under 700 °C temperature condition.

T1= 700 °C = 923.15 (K)	
زمان (h)	طول عمر (h)
500h	0.0000
1000h	0.9955
1500h	1.2280

نمودار شکل ۸ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار اول در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۷ نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودار مقدار S در تکرار اول در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد.

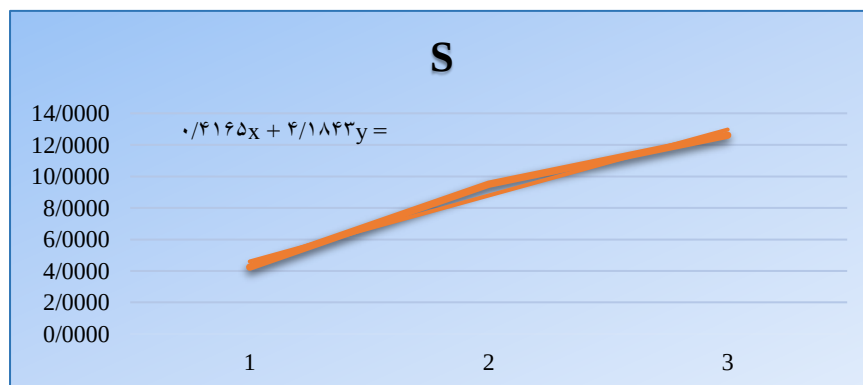
Figure 8- S value versus time in the first repetition at 750 °C.

جدول ۷- داده های تکرار اول آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد.

Table 7- First repetition data of the degradation test at three time intervals under 750 °C temperature condition.

T1= 750 °C = 923.15 (K)	
طول عمر (h)	زمان (h)
0.0000	500h
0.9555	1000h
1.0735	1500h

نمودار شکل ۹ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار دوم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۸ نشان داده شده است.



شکل ۹- نمودار مقدار S در تکرار دوم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد.

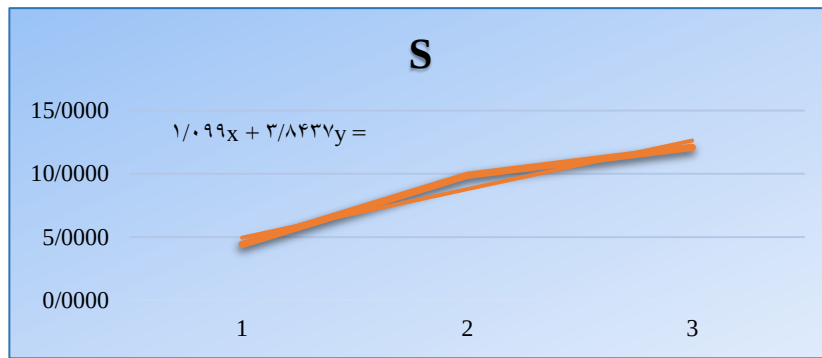
Figure 9- S value versus time in the second repetition at 750 °C.

جدول ۸- داده های تکرار دوم آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد.

Table 8- Second repetition data of the degradation test at three time intervals under 750 °C temperature condition.

T1= 750 °C = 923.15 (K)	
طول عمر (h)	زمان (h)
0.0000	500h
0.9530	1000h
1.0649	1500h

نمودار شکل ۱۰ از مقادیر مولفه کلیدی S در تکرار سوم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد و در سه زمان ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ ساعت ترسیم و مقادیر TF در جدول ۹ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نمودار مقدار S در تکرار سوم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد.

Figure 10- S value versus time in the third repetition at 750 °C

جدول ۹- داده های تکرار سوم آزمون تنزل کارکرد در سه سطح برای زمان و در حالت دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد.

Table 9- Third repetition data of the degradation test at three time intervals under 750 °C temperature condition.

T1= 750 °C = 923.15 (K)	
زمان (h)	طول عمر (h)
500h	0.0000
1000h	0.7946
1500h	0.8685

در نتیجه جدول ۱۰ نتیجه نهایی به دست آمده از شکل ها و جدول های قبل می باشد.

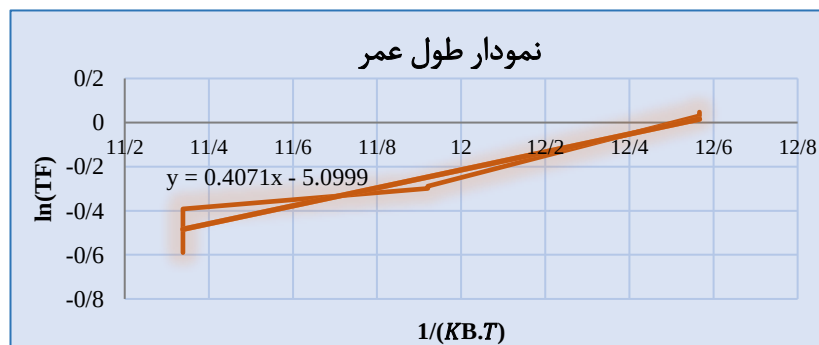
جدول ۱۰- طول عمرهای سیستم در تنش های مختلف.

Table 10- System lifetimes under different stress levels.

دما c	تکرار	TF (h)
650 °C = 923.15 (K)	اول	1.0487
650 °C = 923.15 (K)	دوم	1.0381
650 °C = 923.15 (K)	سوم	1.0306
700 °C = 973.15 (K)	اول	0.749
700 °C = 973.15 (K)	دوم	0.7445
700 °C = 973.15 (K)	سوم	0.7412
750 °C = 1023.15 (K)	اول	0.6763
750 °C = 1023.15 (K)	دوم	0.6726
750 °C = 1023.15 (K)	سوم	0.5544

۵-۵- محاسبه طول عمر

با استفاده از داده های جدول ۱۰ و معادله (۷) و جای گذاری مقادیر مربوطه نمودار طول عمر قطعه به صورت زیر است:



شکل ۱۱- نمودار طول عمر.

Figure 11- Lifetime diagram.

با توجه به اینکه شیب خط نمودار بالا برابر با مقدار مجهول Q است، در نتیجه مقدار برآورد شده برای $Q=0.4071$ می باشد که این مقدار همان انرژی اکتیواسیون مجهول سیستم در شرایط عملیاتی لحاظ شده است. با استفاده از مقدار انرژی اکتیواسیون به دست آمده و با استفاده از معادله (۷) می توان مقدار طول عمر سیستم را در هر دمایی محاسبه نمود. جدول ۱۱ مقدار طول عمر سیستم با استفاده از مقدار انرژی اکتیواسیون به دست آمده در چهار دمای ۵۵۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۸۵۰ را نشان می دهد.

جدول ۱۱- مقدار طول عمر سیستم در چهار دما دیگر.

Table 11- The system's lifetime values at four additional temperature levels.

دما °C	TF (h)
550 °C = 823.15 (K)	1.8917
600 °C = 873.15 (K)	1.3619
800 °C = 1073.15 (K)	0.4970
c = 1123.15 (K)	0.4088

۶- نتیجه گیری

پژوهش حاضر به ارایه و پیاده سازی یک چارچوب تلفیقی پیشرفته برای مدل سازی و تحلیل قابلیت اطمینان اجزای مکانیکی تحت بارهای حرارتی متغیر پرداخته است. این چارچوب با ترکیب آزمون تنزل کارکرد و آزمون عمر شتاب یافته بر اساس منطق یکپارچه سازی داده های تخریب و خرابی، بستری منسجم برای تخمین دقیق طول عمر اجزای بحرانی فراهم ساخته است. در فاز نخست، با طراحی دقیق آزمون ADT در سه سطح دمایی، روند تخریب تدریجی مولفه عملکردی نازل موتور توربینی مدل سازی و تحلیل گردید. تحلیل داده های تنزل با استفاده از مدل های شتاب فیزیکی-آماري از جمله مدل آرنیوس، منجر به استخراج پارامترهای کلیدی نظیر نرخ تنزل، انرژی فعال سازی (Q) و AF شد که پایه ای برای پیش بینی رفتار خرابی در شرایط عملیاتی فراهم ساخت.

این گام، با دقت و انطباق بالا نشان داد که مدل توان-آرنیوس قادر است ساز و کار تخریب حرارتی را به خوبی کمی سازی کند. در ادامه، با استفاده از داده ها و پارامترهای خارج شده از مرحله ADT ، آزمون ALT در سطوح تنش بالاتر طراحی و اجرا شد. این هم راستایی میان طراحی ADT و ALT ، موجب افزایش انسجام داده ها و کاهش خطای برآورد طول عمر گردید. تحلیل آماری داده های تلفیقی از هر دو آزمون با بهره گیری از روش MLE و برازش توزیع های لگ نرمال و بولیوا، منجر به توسعه یک مدل قابلیت اطمینان جامع و قابل تعمیم گردید. تطابق بالای نتایج مدل سازی شده با داده های تجربی واقعی، بیانگر کفایت آماری و فیزیکی مدل پیشنهادی است. از منظر مهندسی، این رویکرد تلفیقی چند مزیت اساسی ارایه می دهد:

۱. کاهش قابل توجه زمان و هزینه های آزمون از طریق بهره برداری هدفمند از داده های تنزل برای طراحی دقیق تر آزمون های خرابی است.
۲. امکان ارزیابی رفتار خرابی اجزا در سطوح مختلف تنش حرارتی، با تکیه بر پایه علمی مستحکم و داده های تجربی معتبر است.
۳. افزایش دقت پیش بینی طول عمر و توانایی تحلیل حساسیت مدل نسبت به عوامل محیطی و ویژگی های ماده است.

تحلیل های حساسیت نشان داد که پارامترهای دما، نرخ تنزل و ویژگی های فیزیکی ماده، تاثیر تعیین کننده ای بر زمان رسیدن به آستانه خرابی دارند. این یافته ها نشان می دهند که مدل ارایه شده نه تنها ابزار پیش بینی کننده است، بلکه درک عمیق تری از رفتار دینامیکی مولفه ها در معرض بارهای محیطی نیز فراهم می کند. در جمع بندی، چارچوب پیشنهادی را می توان به عنوان یک الگوی کاربردی و توسعه پذیر برای سایر اجزای مکانیکی حساس در حوزه های هوافضا، صنایع دفاعی و سامانه های با قابلیت اطمینان بالا در نظر گرفت. این مدل، توانایی استخراج دانش از داده های محدود آزمون گاهی و تعمیم آن به سناریوهای پیچیده عملیاتی را دارا بوده و می تواند به عنوان ابزاری راهبردی در مهندسی قابلیت اطمینان مدرن به کار گرفته شود. در مجموع، این تحقیق با ارایه یک مدل تجربی-آماري تلفیقی، نه تنها امکان تخمین دقیق تر طول عمر اجزای حساس را فراهم ساخته، بلکه چارچوبی عملیاتی برای مهندسان صنایع حساس ایجاد کرده است. پیاده سازی موفق این مدل در شرایط واقعی، نشان دهنده پتانسیل بالای آن برای جایگزینی روش های سنتی پرهزینه و زمان بر در ارزیابی قابلیت اطمینان است.

- [1] Sharifi, S. M. M., Gholami Mazinan, H., Karbasian, M., & Sharifi, S. M. H. (2011). *Reliability engineering*. Omid Enghelab Publications. <https://B2n.ir/yy1425>
- [2] Peng, W., Li, Y. F., Yang, Y. J., Huang, H. Z., & Zuo, M. J. (2014). Inverse Gaussian process models for degradation analysis: A Bayesian perspective. *Reliability engineering & system safety*, 130, 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.res.2014.06.005>
- [3] Pandey, M. D., & Lu, D. (2013). Estimation of parameters of degradation growth rate distribution from noisy measurement data. *Structural safety*, 43, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.02.002>
- [4] Ling, M. H., Tsui, K. L., & Balakrishnan, N. (2014). Accelerated degradation analysis for the quality of a system based on the gamma process. *IEEE transactions on reliability*, 64(1), 463–472. <https://doi.org/10.1109/TR.2014.2337071>
- [5] Chen, H., & Yuan, H. (2010). Reliability assessment based on proportional degradation hazards model. *2010 IEEE 17th international conference on industrial engineering and engineering management* (pp. 958–962). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEEM.2010.5646465>
- [6] Ye, Z. S., Chen, L. P., Tang, L. C., & Xie, M. (2014). Accelerated degradation test planning using the inverse Gaussian process. *IEEE transactions on reliability*, 63(3), 750–763. <https://doi.org/10.1109/TR.2014.2315773>
- [7] Shen, Y., Zhang, C., Tan, Y., & Chen, X. (2011). Accelerated degradation testing for systems with multiple performance parameters. *2011 international conference on quality, reliability, risk, maintenance, and safety engineering* (pp. 292–296). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2011.5976615>
- [8] Wang, L., Pan, R., Li, X., & Jiang, T. (2013). A Bayesian reliability evaluation method with integrated accelerated degradation testing and field information. *Reliability engineering & system safety*, 112, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.res.2012.09.015>
- [9] Wang, L., Li, X., Jiang, T., & Zhuang, X. (2011). The adt evaluation method based on mcmc. *2011 IEEE international conference on industrial engineering and engineering management* (pp. 1251–1255). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2011.6118116>
- [10] Collins, D. H., Freels, J. K., Huzurbazar, A. V, Warr, R. L., & Weaver, B. P. (2013). Accelerated test methods for reliability prediction. *Journal of quality technology*, 45(3), 244–259. <https://doi.org/10.1080/00224065.2013.11917936>
- [11] Elsayed, E. A. (2012). *Reliability engineering*. John Wiley & Sons. <https://B2n.ir/ku9415>
- [12] Limon, S., Yadav, O. P., & Liao, H. (2017). A literature review on planning and analysis of accelerated testing for reliability assessment. *Quality and reliability engineering international*, 33(8), 2361–2383. <https://doi.org/10.1002/qre.2195>
- [13] Wang, H., Zhao, Y., Ma, X., & Wang, H. (2017). Optimal design of constant-stress accelerated degradation tests using the M-optimality criterion. *Reliability engineering & system safety*, 164, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.010>
- [14] Si, X. S., Wang, W., Hu, C. H., & Zhou, D. H. (2011). Remaining useful life estimation-a review on the statistical data driven approaches. *European journal of operational research*, 213(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.11.018>
- [15] Zhang, Y. (2020). Graphic illustration for mechanical reliability design (3)-testing and data collection. *Life cycle reliability and safety engineering*, 9, 303–318. <https://doi.org/10.1007/s41872-020-00126-z>
- [16] Gray, K. A., & Paschke, J. J. (2016). *Next generation HALT and HASS: Robust design of electronics and systems*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118700228>
- [17] Tsai, C. C., Tseng, S. T., & Balakrishnan, N. (2010). Optimal burn-in policy for highly reliable products using gamma degradation process. *IEEE transactions on reliability*, 60(1), 234–245. <https://doi.org/10.1109/TR.2010.2087430>
- [18] Ebeling, C. E. (1996). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. Waveland Press. <https://www.amazon.com/Introduction-to-Reliability-Maintainability-Engineering/dp/1577666259>
- [19] Agrawal, V. D., Kime, C. R., & Saluja, K. K. (2002). A tutorial on built-in self-test. I. Principles. *IEEE design & test of computers*, 10(1), 73–82. <https://doi.org/10.1109/54.199807>
- [20] Shi, Y., & Meeker, W. Q. (2011). Bayesian methods for accelerated destructive degradation test planning. *IEEE transactions on reliability*, 61(1), 245–253. <https://doi.org/10.1109/TR.2011.2170115>
- [21] Lu, C. J., & Meeker, W. O. (1993). Using degradation measures to estimate a time-to-failure distribution. *Technometrics*, 35(2), 161–174. <https://doi.org/10.1080/00401706.1993.10485038>
- [22] Zhang, X. (2013). *Experiment design and reliability analysis of accelerated degradation test* [Thesis]. University of Cincinnati. https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/etd/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=ucin1378197282
- [23] Sawant, M., & Christou, A. (2012). Failure modes and effects criticality analysis and accelerated life testing of LEDs for medical applications. *Solid-state electronics*, 78, 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2012.05.042>
- [24] McPherson, J. W. (2013). Time-to-failure modeling. In *Reliability physics and engineering: Time-to-failure modeling* (pp. 37–49). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00122-7_4
- [25] Meeker, W., Escobar, L., & Hong, Y. (2009). Using accelerated life tests results to predict product field reliability. *Technometrics*, 51 (2), 146–161. <https://doi.org/10.1198/TECH.2009.0016>
- [26] Yang, G. (2005). *Contributions to planning and analysis of accelerated testing* [Thesis]. <https://dissertation.com/abstract/1380214>
- [27] DeBonis, J. R. (2010). Gas turbine engines: Nozzles. In *encyclopedia of aerospace engineering*. Wiley Online Library. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470686652.eae096>
- [28] Deere, K. (2003). Summary of fluidic thrust vectoring research at nasa langley research center. *21st AIAA applied aerodynamics conference* (p. 3800). American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2003-3800>
- [29] Gamble, E., Terrell, D., & DeFrancesco, R. (2004). Nozzle selection and design criteria. *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE joint propulsion conference and exhibit* (p. 3923). American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2004-3923>
- [30] Nelson, W. B. (2009). *Accelerated testing: Statistical models, test plans, and data analysis*. John Wiley & Sons. <https://B2n.ir/tb2103>

- [31] Carey, M. B., & Koenig, R. H. (1991). Reliability assessment based on accelerated degradation: A case study. *IEEE transactions on reliability*, 40(5), 499–506. <https://doi.org/10.1109/24.106763>
- [32] Boulanger, M., & Escobar, L. A. (1994). Experimental design for a class of accelerated degradation tests. *Technometrics*, 36(3), 260–272. <https://doi.org/10.1080/00401706.1994.10485803>
- [33] Tobias, P. A., & Trindade, D. (2011). *Applied reliability*. CRC Press. <https://B2n.ir/kp8883>
- [34] Tseng, S. T., & Yu, H. F. (1997). A termination rule for degradation experiments. *IEEE transactions on reliability*, 46(1), 130–133. <https://doi.org/10.1109/24.589938>
- [35] Escobar, L. A., Meeker, W. Q., Kugler, D. L., & Kramer, L. L. (2003). Accelerated destructive degradation tests: Data, models, and analysis. In *Mathematical and statistical methods in reliability* (pp. 319–337). World Scientific. https://doi.org/10.1142/9789812795250_0021
- [36] Sanchez, L. M., & Pan, R. (2009). Product robust design via accelerated degradation tests. *2009 annual reliability and maintainability symposium* (pp. 89–94). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2009.4914656>
- [37] Ding, Y., Yang, Q., King, C. B., & Hong, Y. (2019). A general accelerated destructive degradation testing model for reliability analysis. *IEEE transactions on reliability*, 68(4), 1272–1282. <https://doi.org/10.1109/TR.2018.2883983>
- [38] Xu, Z., Hong, Y., & Jin, R. (2016). Nonlinear general path models for degradation data with dynamic covariates. *Applied stochastic models in business and industry*, 32(2), 153–167. <https://doi.org/10.1002/asmb.2129>
- [39] Xiao, X., & Ye, Z. (2016). Optimal design for destructive degradation tests with random initial degradation values using the Wiener process. *IEEE transactions on reliability*, 65(3), 1327–1342. <https://doi.org/10.1109/TR.2016.2575442>
- [40] Chen, D. G., Lio, Y., Ng, H. K. T., & Tsai, T. R. (2017). *Statistical modeling for degradation data*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5194-4>
- [41] Ruz, D. M. C., Pedersen, H. C., Liniger, J., Bhola, M., & Wratt, G. (2024). A Review of state of the art for accelerated testing in fluid power pitch systems. *Wind*, 4(3), 208–226. <https://doi.org/10.20944/preprints202405.2070.v1>
- [42] Guo, J., Han, Z., Wu, S., Long, J., Chen, C., & Liu, Z. (2025). Multi-objective optimization design for accelerated degradation test based on game theory. *Scientific reports*, 15(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98959-0>